



B. Diezma (1), P. Barreiro (2) y E. Correa (3)

(1) Doctora Ingeniera Agrónoma, (2) Profesora Titular de Universidad, (3) Doctora Ingeniera Agrónoma
Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación LPF-TAG. Universidad Politécnica de Madrid.

Equipamiento para laboratorios inteligentes en el sector hortofrutícola

Este artículo presenta una revisión de las tecnologías no destructivas de uso potencial en los laboratorios (at line) de control de calidad en el sector hortofrutícola. Se describen equipos comerciales y prototipos basados en principios de funcionamiento: mecánico-acústicos, ópticos (espectrofotometría) y de detección de volátiles, con mención a sus fortalezas y debilidades. Se presentan los procedimientos y técnicas complejas para el manejo y análisis de datos, y se analiza la implantación de sistemas de gestión de calidad en laboratorios.

PUNTOS CLAVE

Los equipos mecánicos, ópticos y acústicos son en la actualidad los más robustos para la determinación de calidad de los productos hortofrutícolas de forma no destructiva

Las técnicas no destructivas en los procesos de muestreo, suponen una importante ventaja al permitir la utilización de las mismas unidades en múltiples determinaciones y/o la reincorporación del producto a la cadena de confección

Su aplicación diaria en la industria genera grandes volúmenes de datos que en la actualidad están infrutilizados.

El empleo de sistemas de gestión de bases de datos apropiadas favorecerá la interacción universidad-empresa.

La incorporación de técnicas de minería de datos permite desenmascarar patrones de comportamiento ocultos entre los factores de producción y de proceso.

El objetivo final de los agentes implicados en la comercialización de frutas y hortalizas frescas es proporcionar un producto acorde con las especificaciones del cliente y con la demanda del consumidor. El beneficio final de estos agentes depende de su capacidad de incrementar la información disponible acerca del producto más allá de lo exigido según normativa, como herramienta estratégica para su expedición.

Técnicas no destructivas en los procesos de muestreo

La evolución de la determinación de algunos parámetros de calidad interna en frutas y hortalizas, transita de la utilización de ensayos destructivos, estándares de facto, a la aplicación de técnicas no destructivas. Aunque algunas empresas ofrecen ya equipos para su instalación on-line (evaluación en línea de todo el producto), es necesario señalar que la mayoría de estos sistemas se encuentran en su primera fase de vida comercial, y el sector ha manifestado la necesidad de una certificación progresiva de su funcionamiento y la adaptación a productos y situaciones concretas. Las tecnologías no destructivas para la evaluación cualitativa se adaptan perfectamente at-line (en laboratorios sobre muestras preseleccionadas). Las técnicas no destructivas en los procesos de muestreo, suponen una importante ventaja al permitir la utilización de las mismas unidades en múltiples determinaciones y/o la reincorporación del producto a la cadena de confección, además de no generar residuos que es necesario evacuar teniendo en cuenta los criterios de control sanitario en las centrales de confección. A continuación se describen equipos comerciales y prototipos basados en diferentes principios de funcionamiento para la determinación de la firmeza, la composición química, el estado de madurez y la detección de defectos internos.

Equipos mecánico-acústicos

Actualmente se encuentran disponibles equipos que basan su estimación en la respuesta acústica de los productos ante una excitación vibratoria o de impacto, y sistemas mecánicos basados en el análisis de deceleraciones en un impacto de baja intensidad, aptos para determinar la firmeza y la estructura interna (ahuecados) de los frutos.

En la mayor parte de los equipos acústicos se ha implementado la adquisición de la señal utilizando un micrófono situado a unos milímetros de la superficie de la muestra a estudiar. Otros sí requieren de contacto entre los sensores y la muestra: acelerómetros y algunos sensores piezoeléctricos. Para la obtención del espectro en frecuencias a partir de la señal en el tiempo se aplica el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), solución computacional que optimiza el tiempo y el modo de cálculo del algoritmo que permite establecer la dualidad entre la señal en el tiempo y la señal en frecuencia. Entre los parámetros obtenidos destaca el coeficiente de rigidez ($f_2m^{2/3}$), que es un índice de firmeza basado en la frecuencia resonante (f)



corregido en función de la masa del producto, evitando el efecto que ésta tiene en el valor de f . También se han definido parámetros como las magnitudes de banda (sumatorio de las magnitudes del espectro entre dos frecuencias determinadas). Otras propuestas optan por medir la velocidad de la onda acústica transmitida a través del producto con dos micrófonos separados una distancia conocida.

Los sistemas mecánicos basados en el estudio del impacto, miden la respuesta mecánica del fruto por medio de un acelerómetro piezoeléctrico que aporta una curva de aceleración/tiempo que permite distinguir entre diferentes categorías de firmeza.

En la bibliografía científica pueden encontrarse numerosos prototipos, sin embargo sólo algunos han alcanzado el desarrollo necesario para su comercialización:

- Sinclair Internal Quality-Firmness Tester (iQ): un sensor piezoeléctrico impacta la fruta verticalmente mediante un sistema de aire comprimido. La última versión es un equipo compacto y portátil, con posibilidad de conexión a PC. Una base con dos rodillos rotan la fruta automáticamente impactando en cuatro puntos, obteniéndose un valor medio en la escala de firmeza iQ.
- Impactador lateral LPF-TAG (en fase inicial de comercialización): un brazo giratorio equipado con una cabeza semiesférica rígida de material plástico, en la que se aloja un pequeño acelerómetro uniaxial que registra la aceleración del brazo.
- Equipo acústico LPF-TAG: optimizado para la detección de ahuecados internos en sandías.
- AWETA Acoustic Firmness Sensor (AFS): equipo de sobremesa que pesa e impacta la fruta automáticamente; el micrófono se sitúa cerca de la zona del punto de impacto; se muestra un valor de firmeza

(que incluye la información espectral y el peso de la muestra) y el valor de la frecuencia resonante de máxima intensidad en un rango que puede ser elegido por el usuario. Las últimas versiones incorporan un acelerómetro que aporta otro índice de firmeza basado en la técnica de impacto.

Equipos ópticos: espectrofotometría

La espectroscopia es el análisis de las particularidades de la interacción de la radiación electromagnética con la materia, que aplicada a los productos hortofrutícolas de forma no destructiva se emplea para la estimación de parámetros organolépticos: contenido en agua, acidez, sólidos solubles, etc.

Los principales equipos comerciales compactos para la evaluación de frutas en laboratorio son:

- QS200 (UNITEC): evalúa contenido en azúcares ($^{\circ}\text{Brix}$), acidez (gr/l) consistencia de la pulpa (kg/cm^2) y grado de maduración (unidades adimensionales); tiempo de medida variable, con un mínimo de 0,5s
- FQA-NIRGUN (FANTEC): estima azúcares y acidez (rango 590 - 1.090 nm).
- LUMINAR 5030 (BRIMROSE): permite una configuración más flexible, pues el usuario puede seleccionar y pedir al fabricante el rango de longitudes de onda del equipo.

En la espectroscopia en el infrarrojo cercano, es muy importante el desarrollo de procedimientos de modelos de estimación mediante tratamiento de análisis de datos multivariantes. Para ajustar un modelo de predicción se puede seguir un procedimiento de selección de variables (regresión lineal múltiple paso a paso) o de ajuste global (se utilizan todas las longitudes de onda para la generación de los modelos), que suele venir integrado con el software.

Sensores de gases

Un aroma complejo como el emitido por un fruto (se han identificado más de 300 compuestos volátiles en el aroma emitido por una manzana) se puede describir como una apreciación global, una imagen química (patrón), representativa de esa muestra aromática. Los instrumentos que, compuestos por un conjunto de sensores químicos electrónicos con especificidad parcial, son capaces de crear una imagen química de la muestra gaseosa y reconocerla empleando un apropiado sistema de reconocimiento de patrones, reciben el nombre de narices electrónicas (NE). Las NE, también llamadas (para muchos más correctamente) "sensores de aromas", "sensores de olores" o "sensores de gases", son equipos desarrollados con el objetivo, entre otros, de conseguir la caracterización instrumental del aroma de los alimentos.

Existe una tendencia en la actualidad en el desarrollo de equipos híbridos, como los que comercializa la empresa estadounidense Electronic Sensor Technology (ver figura 1) que combina un mini-cromatógrafo de gases (CG) de columna corta con una matriz de sensores SAW (sensores de onda acústica), que funciona como detector. El mini cromatógrafo realiza una cierta separación de los compuestos de la mezcla, que permite evitar la interferencia de gases como el etanol o el etileno.



Figura 1: nariz electrónica híbrida Z-Nose. Equipo portátil basado en un microcromatógrafo de gases que tiene acoplado como detector una matriz de sensores de onda acústica de superficie.

La correcta elección de la aplicación es un principio básico para la implementación de estos equipos en un laboratorio de calidad; dicha elección pasa por la identificación de procesos con alta variabilidad cualitativa y cuantitativa en la composición gaseosa. En este sentido consideramos de especial interés la supervisión de almacenamiento y conservación de productos frescos así como la identificación de procesos químicos anómalos a lo largo del mismo.

Sistemas informáticos de gestión de la información

En el ámbito de la informática y la computación, una Base de Datos es una colección de registros que se almacena en un ordenador de tal manera que un programa sea capaz de consultar su contenido para dar respuesta a preguntas concretas por parte del usuario. Este programa se denomina genéricamente Sistema de Gestión de la Base de Datos (Database Management System, DBMS).

En los años 70 del siglo XX se propuso como procedimiento de organización el empleo de bases de datos relacionales que representan la información en forma de una multitud de tablas (filas y columnas) emparentadas entre sí.

En los años 90, se definen las Bases de Datos orientadas a objetos, especialmente recomendadas para manejar información compleja, de difícil almacenamiento en tablas, tales como información espacial o multimedia. Este es específicamente el caso de las centrales hortofrutícolas donde coexisten datos escalares como el calibre o la temperatura, con datos vectoriales como el espectro infrarrojo o el perfil aromático de una NE, o espaciales como las imágenes registradas por los sistemas de visión.

Con el cambio de siglo, se ha difundido un nuevo ámbito de innovación en la bases de datos denominado XML (Extended Mark-up Language) cuyo objetivo es eliminar la frontera entre documentos y datos de manera que sea posible una organización conjunta de las distintas piezas de información independientemente del nivel de estructuración de las mismas (figura 2).

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
- <NewDataSet>
- <mts420_results>
  <result_time>2007-06-18T18:52:07.5120000+02:00</result_time>
  <nodeid>625</nodeid>
  <parent>0</parent>
  <voltage>410</voltage>
  <humid>1312</humid>
  <humtemp>6970</humtemp>
  <prtemp>26581</prtemp>
  <press>16794</press>
  <taosch0>238</taosch0>
  <taosch1>217</taosch1>
  <accel_x>512</accel_x>
  <accel_y>3855</accel_y>
</mts420_results>
- <mts420_results>
  <result_time>2007-06-18T18:58:28.3100000+02:00</result_time>
  <nodeid>625</nodeid>
  <parent>0</parent>
```

Figura 2. Extracto de un fichero de datos XML

Para que una colección de datos sea considerada una base de datos, ha de mostrar una serie de

propiedades entre las que destacan la garantía de la integridad y la calidad de los datos, el acceso compartido a una comunidad de usuarios y la viabilidad de empleo de un lenguaje de consulta (Query Language).

Minería de datos

Con el término Minería de Datos (Data Mining) se aglutinan un conjunto de técnicas de análisis de datos multivariantes tanto supervisadas, como no supervisadas, capaces de explorar ingentes bases de datos en busca de patrones de comportamiento no aleatorios. Se trata de motores de búsqueda cada vez más cercanos al concepto de aprendizaje automático e inteligencia artificial que tienen en común una profunda base tanto de estadística como de álgebra avanzadas.

Si con anterioridad a la segunda guerra mundial el mecanismo básico de estudio de los fenómenos biológicos se basó en la realización de experimentos de reducidas dimensiones bajo condiciones estrictamente controladas, en la actualidad el universo poblacional en su conjunto pasa a convertirse en el sujeto de observación. Es decir, el conjunto de las producciones hortofrutícolas junto con las condiciones de cultivo y de manipulación, codificados en términos cuantitativos y cualitativos mediante una variedad de parámetros físicos, químicos, y medio-ambientales, es evaluado en términos de relaciones geométricas sencillas.

El origen de las técnicas de análisis de datos multidimensionales, se encuentra en los estudios de Hotelling que en los años 30 del siglo XX formuló las bases del método de Análisis de Componentes Principales (ACP en castellano).

Es importante hacer constar
que la calidad del análisis
depende de forma
fundamental de la calidad
y universalidad de la
información recogida

Esta técnica está basada en la condensación de la información y su representación posterior en un espacio definido mediante un reducido número de nuevas variables o Componentes Principales, establecidos como combinación lineal de los parámetros originales (figura 3).

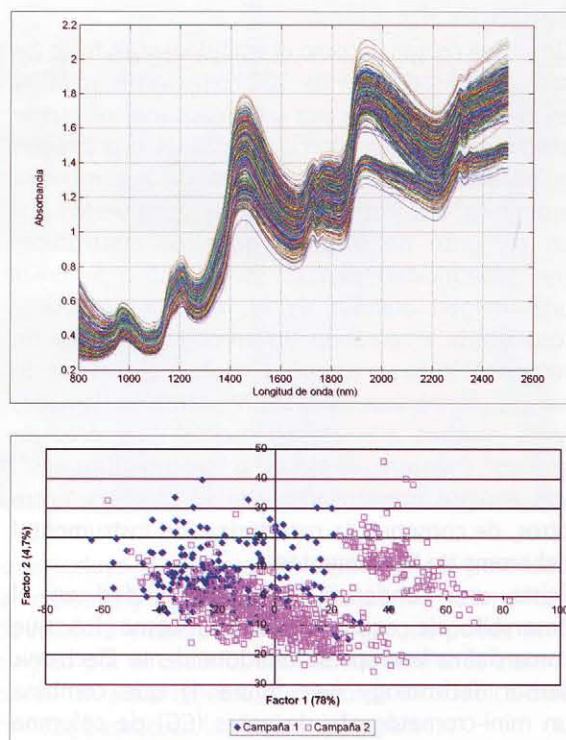


Figura 3. Espectros de absorbancia NIR, datos procedentes de 2 campañas (izqda). Representación de los casos de cada campaña en función de los Factores (o componentes principales) 1 y 2 obtenidos mediante análisis de componentes principales (dcha).

Tanto el ACP definido por Hotelling, como el Análisis Canónico General (proyección ortogonal sobre un sub-espacio vectorial) definidos por Spearman y Pearson también a principios del siglo XX permanecieron en un estado latente hasta la década de los 80, debido a los ingentes requerimientos de cálculo numérico en su resolución. El desarrollo de los microprocesadores y ordenadores personales, junto con el alumbramiento de la sensorica como parte de la física capaz de transformar los distintos estímulos del medio y de los individuos en señales eléctricas de fácil interpretación por parte de los computadores, ha dado lugar a un inmenso campo de trabajo en el que los científicos se trasladan del laboratorio a la industria en busca de la información durmiente oculta en el interior de las bases de datos. Comparados con los métodos de inferencia estadística tradicionales, los métodos multidimensionales parten de un número mucho más reducido de hipótesis (no presupone normalidad, ni homocedasticidad...) lo que redundará en una mucho menor pérdida de información a lo largo del proceso de representación de la misma en nuevos espacios geométricos. El usuario de las técnicas puede partir de unas ideas preconcebidas



que desea evaluar, en cuyo caso recurre a métodos supervisados en los que la información aportada (cualitativa o cuantitativa) es contrastada de forma automática con el resto del universo recogido en la Base de Datos.

Análogamente, puede proponerse el empleo de procedimientos no supervisados, que procuran hacer emerger relaciones internas entre variables e individuos que permanecían ocultas debido al volumen y complejidad de la información acumulada. Como en el caso anterior puede emplear técnicas de clasificación (análisis cualitativo) o de cuantificación de la varianza.

Es importante hacer constar que la calidad del análisis depende de forma fundamental de la calidad y universalidad de la información recogida. De la misma manera, siempre se corre el riesgo de considerar que el universo recogido en la Base de Datos representa la totalidad de las fuentes de variación procedentes del medio. La aparición de patrones de

comportamiento inesperados entre los individuos, ofrece a los técnicos de las cooperativas, convenientemente asesorados por especialistas en este tipo de análisis, pautas de análisis y reconsideración de su experiencia.

El proceso puede resumirse de la siguiente manera: la acumulación sistemática de datos consistentes junto con el empleo de motores de búsqueda genera información, que convenientemente procesada tiene como consecuencia un incremento sustancial del conocimiento del producto y de su circunstancia.

Sistemas de gestión de la calidad en laboratorios

Los consumidores y minoristas europeos, preocupados por la calidad de frutas y hortalizas y por el modo en que éstas se producen, han establecido diferentes protocolos para la certificación de la calidad de cara a sus proveedores; por ejemplo el protocolo EUREP GAP (edición en vigor de marzo 2005), describe las mejores prácticas para la producción primaria agrícola y ganadera. Además, han de cumplir otros estándares de calidad (ISO 22000, ISO 9002, etc.). Todo lo cual implica la exigencia de rigor y precisión en las determinaciones llevadas a cabo en laboratorio: ausencia de residuos y contaminación microbiológica..., lo que se pretende sea más fácilmente constatable con la implementación de un sistema de gestión de calidad. La Norma UNE-EN ISO 17025 establece los requisitos que se han de verificar a la hora de implementar un sistema de gestión de la calidad en los laboratorios.

Los aspectos fundamentales de la Norma se organizan en: alcance (definición exacta de las actividades del laboratorio que quedan bajo las exigencias de la Norma), requisitos de gestión y requisitos técnicos. Aunque la Directiva Europea sobre medidas adicionales relativas al control oficial de los productos alimenticios (93/99/CEE) sólo obliga a los laboratorios oficiales de control de alimentos a acogerse a un sistema de normas de calidad (artículo 3), en la práctica es una buena actuación estratégica para las empresas del sector hortofrutícola. Nos encontramos por tanto en el principio de un proceso irreversible, que veremos implantarse en nuestro país en un futuro próximo.

.....
 * (Referencia bibliográfica de autores)
 La bibliografía completa de este artículo
 puede ser solicitada en alimentacion@rbi.es
